

Análisis de los índices extremos de precipitación en Colombia y su relación con el fenómeno ENSO

Analysis of the extreme indices of precipitation in Colombia and its relationship with the ENSO phenomenon

Maycol Francisco Mena-Palacios¹, Reiner Palomino-Lemus^{2,3}, Yenny Marcela Toro-Ortiz², Samir Córdoba-Machado^{1,3}, William Murillo-López^{2,4}

Resumen

Objetivo: Analizar los efectos de la precipitación extrema y su relación con el fenómeno ENSO en Colombia (caso de estudio departamento del Chocó), en el período 1982-2015 para junio-julio-agosto. **Materiales y métodos:** El análisis de los eventos extremos en Colombia se llevó a cabo usando **índices extremos de precipitación**, calculados a partir del conjunto de datos del Centro Mundial de Climatología de la Precipitación. El análisis de tendencia de los índices se realizó mediante la prueba no paramétrica de Mann-Kendall y el estimador de pendiente de Sen se utilizó para calcular la magnitud de la tendencia, además, buscó la relación con distintos patrones de teleconexión. **Resultados:** Los patrones espaciales en todos los índices de precipitación extrema indicaron tendencias mixtas sobre la región Pacífica y el Piedemonte Llanero. Los índices húmedos exhiben una tendencia positiva no homogénea, y los índices secos presentan tendencia negativa de manera generalizada en el país. Los patrones de teleconexión relacionados con el océano Pacífico inciden negativamente en los índices húmedos, pero positiva con el número máximo de días secos consecutivos. En el departamento del Chocó se encontraron tendencias positivas de los días secos consecutivos en municipios como: Acandí, Juradó, Litoral del San Juan y Sipí, y tendencias negativas en municipio del centro del departamento como Quibdó e Istmina. **Conclusiones:** Los patrones de teleconexión del océano Pacífico han ocasionado sequías, mientras que, en el Atlántico, los índices de lluvia han sugerido condiciones más húmedas durante las últimas cuatro décadas y un número creciente de eventos de fuertes lluvias. En el departamento del Chocó, los municipios de la costa pacífica y el norte tienen tendencias al aumento de los eventos extremos de sequía, pero los municipios en el centro del departamento presentan tendencias positivas en las condiciones más húmedas asociado con eventos extremos de fuertes lluvias.

Palabras clave: Cambio climático, Eventos extremos, Departamento del Chocó, Patrones de teleconexión, Variabilidad climática.

Abstract

Objective: The main purpose of this study was to understand seasonal variations in the intensity, frequency and duration of extreme precipitation events in Colombia (Case study in Chocó department), during the period 1982-2015, based on a set of 6 selected precipitation indices calculated from stations' daily data, for the June-July-August. **Materials and Methods:** The analysis of extreme events in Colombia was carried out, using extreme precipitation indexes, calculated from the data set of the World Precipitation Climatology Center. Trend analysis of the indices was carried out using Mann-Kendall nonparametric test, and Sen's slope estimator was used for calculating the magnitude of trend. **Results:** The spatial patterns in all the extreme precipitation indices indicated mixed trends on the Pacific region and the Piedemonte Llanero. The wet indices show a non-homogeneous positive trend, but the dry indices show a general negative trend in Colombia. Teleconnection patterns associated with the Pacific Ocean have a negative impact on the wet indices, but a positive one the maximum number of consecutive dry days. In the department of Chocó, positive tendencies of the consecutive dry days were found in municipalities such as: Acandí, Juradó, Litoral del San Juan and Sipí, and negative tendencies in the municipality of the centre of the department, for example Quibdó and Istmina. **Conclusions:** The teleconnection patterns of the Pacific Ocean have caused droughts, while on the Atlantic Sea, the rainfall indices have suggested wetter conditions during the last four decades and an increasing number of heavy rainfall events. In the department of Chocó, the municipalities on the Pacific coast and in the North have a tendency to increase extreme drought events, but the municipalities in the centre of the department have positive trends in the wetter conditions associated with extreme rainfall events.

¹ Centro de Investigación en Energías Renovables y Climatología (CIERCLIMA) de la Universidad Tecnológica del Chocó, Chocó, Colombia. Autor correspondencia: d-maycol.mena@utch.edu.co

² Grupo de Investigación en Energías renovables y meteorológica (GIERMET) Universidad Tecnológica del Chocó, Quibdó, Colombia.

³ Facultad de ingeniería, Universidad Tecnológica del Chocó, Quibdó, Colombia.

⁴ Facultad de Educación, Departamento de matemáticas y física, Universidad Tecnológica del Chocó, Quibdó, Colombia.

Fecha de recibido: Agosto 21, 2015 Fecha de aprobación: Diciembre 3, 2015

DOI: <http://dx.doi.org/10.18636/riutch.v35i1.814>

Keywords: Climate change, Climate variability, Department of Chocó, Extreme events, Teleconnection patterns.

Introducción

La variabilidad climática asociada con el cambio climático antropogénico es sin duda el principal problema medioambiental, social y económico del siglo XXI y que se ha convertido en uno de los retos más importantes y urgentes al que se enfrentan muchas regiones del mundo (Collins *et al.*, 2013). Países de América Latina y del Caribe, en especial Colombia y la región del departamento del Chocó, son especialmente sensibles y vulnerables, porque se encuentran expuestos a la acción de un sinnúmero de eventos hidrometeorológicos extremos asociados con la variabilidad climática y el cambio climático (Córdoba-Machado, 2015; Palomino-Lemus *et al.* 2017). Precipitation (Pt. En este sentido, la región del Pacífico colombiano y, particularmente el departamento del Chocó, merecen especial atención, por su ubicación geográfica, características geomorfológicas e hidrológicas, las cuales interactúan en una compleja superposición de procesos físicos, de diversas escalas espacio temporales, representando una potencial amenaza para las poblaciones y el desarrollo económico del departamento. Además, si a esto se adicionan los efectos de la Cordillera de los Andes, que actúa como una barrera condicionante del flujo troposférico, al igual que, las condiciones húmedas de la cuenca Amazónica y la migración de la Zona de Convergencia Intertropical (ZIC), entre otros, se podría considerar al departamento del Chocó, como una región que presenta características atmosféricas y climáticas únicas en el planeta (Garreaud y Aceituno, 2007).

El estudio de los eventos extremos de preparación ha despertado un gran interés, debido a que permiten identificar los impactos ocasionados para establecer mecanismos y estrategias de medidas de mitigación y adaptación frente a la variabilidad climática. Para monitorear los

eventos extremos en Europa se usan conjuntos de datos en cuadrícula (Casanueva *et al.*, 2014; Herrera *et al.*, 2010) y en EEUU (Donat *et al.*, 2013; Peterson *et al.*, 2013). Zhu *et al.* (2017) destacan la importancia del uso de datos de cuadrícula, porque permiten identificar patrones de comportamientos no capturados por estaciones puntuales, además de tener la capacidad de reproducir de manera coherente la distribución espacial y temporal de la precipitación y temperatura de una región.

Por otra parte, algunos de los informes del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) afirman que, desde 1950 se han observado cambios en la dinámica de algunos fenómenos hidrometeorológicos extremos y en el clima global, como el aumento de la temperatura diurna durante el verano, las fuertes precipitaciones y la disminución de la temperatura nocturna durante el invierno en muchas partes del mundo (Pachauri *et al.*, 2014). Además, en Colombia algunos de estos cambios también han sido analizados por Pabón (2012), al evaluar las proyecciones de algunos modelos de circulación general (GCM) encontró tendencias positivas en los eventos extremos asociados con un aumento de la temperatura media. Los extremos pueden tener efectos devastadores como aumento de precipitaciones y temperaturas extremas, de ahí que, otra contribución importante es la realizada por Casanueva *et al.* (2014), quien con su equipo, analizaron los cambios asociados con las variaciones en la frecuencia y ocurrencia de eventos extremos, evidenciando su relación con el aumento de la temperatura global y los cambios en la circulación general de la atmósfera asociadas con el fenómeno ENSO (Scian y Pierini, 2013).

“Extremos” es un término amplio que incluye eventos en variables hidrológicas como inundaciones y sequías (Ahmadalipour *et al.*, 2018) a menudo denominados como fenómenos “climá-

tics extremos”. Dependiendo de los objetivos de la investigación y los criterios de evaluación, se emplean varios métodos para el análisis de los extremos. En ese sentido, los eventos climáticos extremos son por lo general fenómenos multifacéticos y son extremadamente difíciles de identificar. Por lo tanto, varios grupos internacionales han hecho muchos intentos para desarrollar índices valiosos que faciliten el monitoreo y el análisis de tales extremos, como los propuestos por el Equipo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático (ETCCDI, 2009), el cual sugirió un conjunto de 27 índices diferentes calculados a partir de datos diarios de temperatura y precipitación (Zhang *et al.*, 2011).

De ahí su amplia utilización en la investigación climática y campos relacionados, debido a su robustez y a su cálculo e interpretación bastante directos. En general, estos índices se usan para evaluar el impacto de los modos de circulación atmosférica a gran escala en los extremos de precipitación estacional y sus efectos a nivel global, por ejemplo, en Europa se destacan los trabajos de Bartolomeu *et al.* (2016); Herrera *et al.* (2012); Santos *et al.* (2017); Zolina *et al.* (2014); en Asia (Basher *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2017; Mei *et al.*, 2018; Panda *et al.*, 2016; Shi *et al.*, 2018; Zhu *et al.*, 2017); en Oceanía (Supari *et al.*, 2018; Westra *et al.*, 2012); en África (Muluneh *et al.*, 2017; Zittis, 2018); y en Norte América (Lader *et al.*, 2017; Long *et al.*, 2012; Powell and Keim, 2014; Yang *et al.*, 2019) que han evidenciado un aumento general de la precipitación en algunas partes del mundo, mostrado un incremento del número de días húmedos y disminución de días secos.

En Colombia se destacan los aportes realizados por el Instituto Hidrológico, Meteorológico y Estudios Ambientales (IDEAM), que analizó los índices extremos de precipitación y temperatura en distintas ciudades del país, con el objeto de hacer una primera caracterización a

nivel general, encontrado que en la mayoría de las zonas, los períodos húmedos exhiben una tendencia negativa, mientras que los períodos secos mostraron tendencia positiva (IDEAM, 2007). Además, se pueden mencionar trabajos en los departamentos de Santander realizados por Pinilla y Pinzón (2012) y en el Valle del Cauca por Cardona-Guerrero *et al.* (2014); Cuartas *et al.* (2017), cuyos resultados identifican un aumento en la ocurrencia de eventos extremos asociados con la precipitación.

Aunque los índices extremos han sido usados ampliamente en el análisis de eventos extremos en distintos lugares del mundo, como se mencionó antes, en este estudio se usarán conjunto de datos de cuadrícula para el cálculo de los índices extremos de precipitación para Colombia escala espacial, además, se buscará relacionar estos con patrones de teleconexión. Los índice de teleconexión o patrones de teleconexión son respuestas atmosféricas a perturbaciones que se producen en distintos lugares del mundo (Hansen *et al.*, 2010), asociados con anomalías atmosféricas y oceánicas que influyen a largas distancias (Casaneuva *et al.*, 2014) en el clima espacio-temporal de una región.

El objetivo de este trabajo fue evaluar en Colombia los efectos de la precipitación extrema y su relación con el fenómeno ENSO (caso de estudio departamento del Chocó), en el período 1982-2015 para la estación de junio, julio y agosto (JJA).

Materiales y métodos

Descripción de zona de estudio. Colombia se encuentra ubicada en el extremo noroccidente de Suramérica (NS), sobre la franja tropical comprendida entre 13°N y 4°S de latitud y 80°W y 67°W de longitud, y una superficie de aproximada de 1'141.748 km², con la particularidad de tener dos costas: una en el océano Pacífico y



Figura 1. Descripción de la zona de estudio que comprende a Colombia y la ubicación del departamento del Chocó y los municipios analizados.

la otra en el océano Atlántico. La geográfica del territorio permite que se presente una gran variedad de fenómenos atmosféricos complejos, condicionados por la interacción océano-atmosférica y las perturbaciones geográficas que origina la cordillera de los Andes la cual alcanzan hasta los 5 km de altitud, y recorre a Colombia de sur a norte. Además, como caso de estudio fueron seleccionados seis municipios del departamento del Chocó (Acandí, Juradó, Carmen del Atrato, Quibdó, Sipí y Litoral del San Juan, Figura 1) el cual se encuentra ubicado al oeste de Colombia, y tiene una superficie aproximada de 46.530 m², entre en los 9°N y 4°N de latitud y los 76° W y 75,5° W de longitud.

Datos de precipitación. Se utilizó como base de datos, los registros diarios de las series de precipitación del Centro Global de Climatológica de Precipitación (GPCC de sus siglas en inglés), que

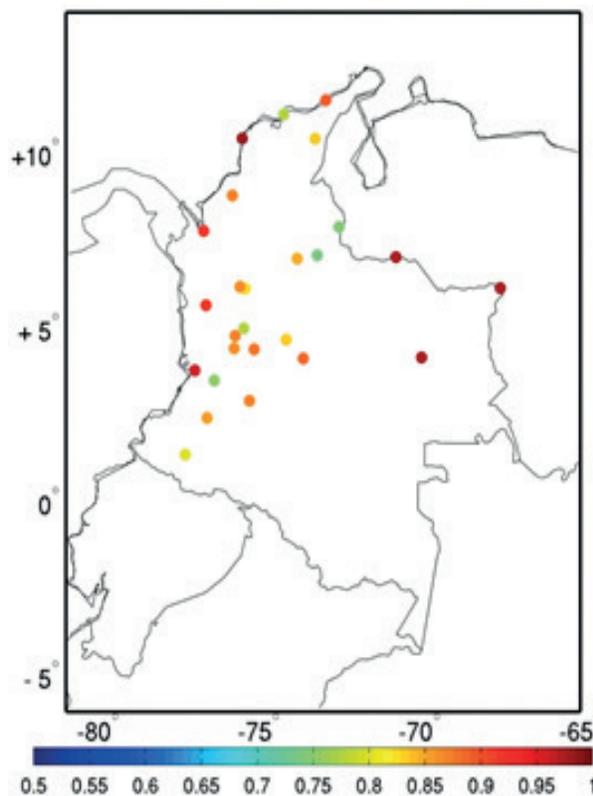


Figura 2. Distribución de las estaciones meteorológicas del IDEAM y coeficientes de correlación lineal entre los datos de 45 estaciones en Colombia con datos del reanaliza de precipitación diaria del GPCC.

son datos de cuadrícula (punto de grid) con una resolución de 0,5° x 0,5° de latitud por longitud. Se usaron los datos diarios de precipitación de 45 estaciones meteorológicas del IDEAM distribuidas en distintos departamentos de Colombia. La información extraída de las bases datos GPCC y el IDEAM comprende el período entre el 1 de enero de 1982 y el 31 de diciembre de 2015. Las series de datos del IDEAM fueron depuradas y homogenizadas. Además, se correlacionaron las estaciones meteorológicas del IDEAM y los puntos más cercanos del conjunto de datos del GPCC, presentando una fuerte correlación con coeficientes de correlación superiores a 0,8 (Figura 2).

Índices de teleconexión. También se consideraron distintos patrones de teleconexión que tiene lugar sobre los océanos Pacífico y Atlántico, y

Tabla 1. Descripción de los índices de eventos extremos de precipitación

ID del índice	Nombre	Descripción	Unidad
R10	Número de días de precipitación fuerte	Recuento anual de días con precipitación superior a 10 mm	Días
R20	Número de días de precipitación muy fuerte	Recuento anual de días con precipitación superior a 20 mm	Días
DDC	Días secos consecutivos	El mayor número de días de consecutivos con precipitación inferior a 1 mm, dentro del año	Día
CWD	Días húmedos consecutivos	El mayor número de días de consecutivos con precipitación \leq a 1 mm, dentro del año	Día
SDII	Índice de intensidad de precipitación simple	Suma anual de precipitación durante días húmedos (precipitación >1 mm) dividida por el recuento anual de días húmedos	mm/día
RX5day	Máxima precipitación en cinco días	Cantidad máxima de precipitación en cinco días consecutivos en un año	Mm

que pueden influir en la viabilidad climática a escala espacial y temporal del clima en Colombia. Los índices de teleconexión utilizados en el presente estudio fueron: el Tripoles Atlántico de las Funciones Empíricas Ortogonales de la Temperatura en la Superficie del Mar (SST-EOF) en adelante (ATLTRI), índice de series temporales Bivariado del ENSO (Biv. ENSO), Pacífico Tropical Oriente de la SST (EOF-PAC), Índice ENSO multivariado (MEI) y extremos del Pacífico oriental tropical (NIÑO1). Estos patrones de teleconexión han sido relacionados con variables atmosféricas comunes como la temperatura, la precipitación y el caudal de ríos en Colombia y América (Córdoba-Machado, 2015; Mejía *et al.*, 2002; Palomino Lemus, 2015). Las series temporales de estos índices se obtuvieron del Laboratorio de Investigación de Sistemas Terrestres (ESRL, 2016) de la NOAA, de los cuales se tomó el período entre 1982-2015 en la estación JJA.

Índices extremos de precipitación. Se utilizaron seis índices extremos asociados con la precipitación de los 27 índices definidos por el ETCCDI descritos en la Tabla 1. Entre los índices incluyen cinco índices húmedos y un índice seco, donde se encuentran: número de días con precipitación fuerte (R10), número de días con precipitación muy fuerte (R20), el número de días secos consecutivos (CDD), el número de días húmedoconsecutivos (CWD), la precipitación consecutiva de 5 días (RX5day) y el índice de intensidad de precipitación simple (SDII). Los índices anteriores, han sido utilizados para estudiar tendencias y/o cambios proyectados en el cambio climáticos en: Europa (Zolina *et al.*, 2014), Asia (Liu *et al.*, 2017), África (Zittis, 2018), Oceanía (Supari *et al.*, 2018), Norte América (Long *et al.*, 2012), Centro y Sur América (Aguilar *et al.*, 2005; Lovino *et al.*, 2018).

Método de análisis. Durante el desarrollo de

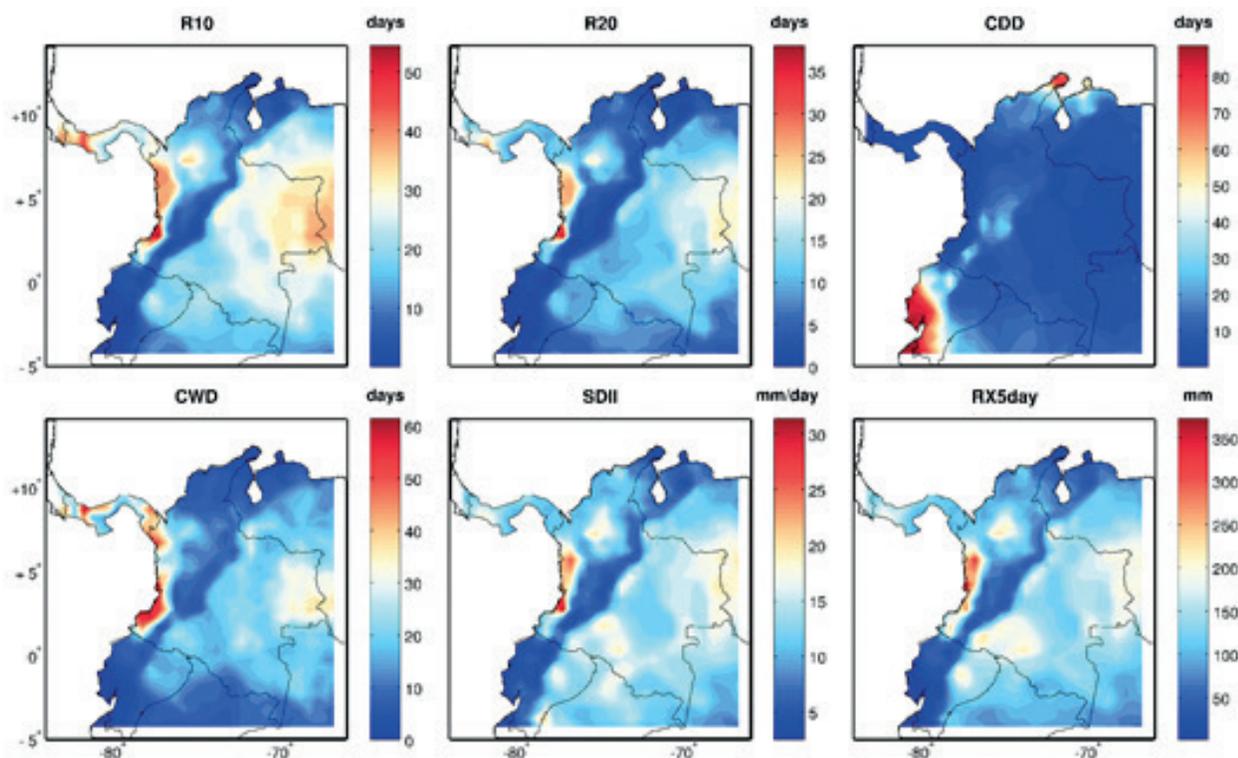


Figura 3. Distribución espacial de los campos medios para los índices extremos, en donde se evidencia valores significativos en la costa pacífica colombiana para el R10, R20, CDD, CWD, SDII y RX5day.

esta investigación, se analizó la influencia de los patrones de teleconexión en los extremos de la precipitación para encontrar explicaciones de su variabilidad en la estación de JJA, mediante una descripción estadística básica, cuyos resultados permiten inferir qué regiones son más propensas a presentar cambios en el clima. Luego, se aplicó una prueba de Mann-Kendall (Kendall, 1975) para analizar las tendencias; se aplicó la prueba Sen (Sen, 1968) con un nivel de confianza del 95%, y por último, se estudió la relación entre los campos medios de los índices extremos y los distintos índices de teleconexión, los cuales pueden explicar las causas físicas de las variaciones de los eventos extremos a largo plazo.

Resultados y discusión

La distribución espacial de los índices extremos de precipitación (R10, R20, CDD, CWD, SDII Y RX5day) se calcularon usando el conjunto de datos del GPCC, para la estación JJA, durante el

período 1982-2015 (Figura 3), donde los valores más altos de R10 se presentaron sobre la región del Pacífico colombiano cubriendo principalmente los departamentos como el Chocó, Valle del Cauca, seguido de un patrón de distribución un poco más débil, específicamente sobre los departamentos del norte del Vichada y Guainía. Los promedios más bajos para R10 se presentan a lo largo de la cordillera de los Andes y el norte del país (Guajira). Este patrón se repitió para los índices extremos R20, CWD, SDII y RX5day. La distribución espacial de los campos medios para CDD indica que valores más altos se encuentran en la parte Norte del país, en el departamento de la Guajira, mientras que promedios moderados se obtuvieron para la cordillera de los Andes.

Respecto a los análisis realizados, utilizando los registros de precipitación diarios de estaciones del IDEAM ubicadas en el departamento del Chocó (Tabla 2), se encuentra que los índices extremos de precipitación R10 y R20 para el mu-

Tabla 2. Valores medios de los índices extremos de precipitación en municipios del departamento del Chocó

Municipio	Latitud	Longitud	R10	R20	CDD	CWD	RX5day	SDII
Quibdó	5,69	76,65	38,82	27,74	4,29	23,74	333,06	26,63
Acandí	8,51	77,28	35,74	17,09	2,71	46,68	137,25	13,64
Carmen del Atrato	5,69	76,14	36,15	20,94	7,35	24,94	201,47	18,64
Jurado	7,11	77,74	34,38	14,18	2,94	46,74	117,87	12,72
Litoral del San Juan	4,26	77,36	38,21	21,21	2,76	52,91	339,21	22,18
Sipí	4,65	76,64	25,82	14,62	6,06	28,76	249,35	18,91

nicipio de Quibdó son promedios más altos que para los otros municipios, mientras que el municipio de El Carmen del Atrato los mayores de días secos son para el índice CDD. El municipio del Litoral del San Juan presenta los promedios más altos en CWD, mientras, municipios como Quibdó, Litoral del San Juan y Sipí tienen los mayores promedios en los índices RX5day y SDII.

En la Figura 4, se presenta la distribución espacial de los resultados de las pruebas de tendencia Z Kendall y Sen para los índices de la precipitación extrema R10, R20, CDD, CWD, SDII Y RX5day en la Estación JJA para el período 1982-2015. Los puntos negros indican aquellas zonas donde las tendencias son estadísticamente significativas, para un nivel de significancia del 5% (coeficiente de Z-Kendall).

Los resultados muestran que los índice R10, R20 y RX5day, presentan un patrón espacial de comportamiento muy similar, con valores positivos sobre la zona central del departamento del Chocó, el pie de monte llanero y el suroeste de Colombia, con tendencia positiva más fuertes en los límites fronterizos entre Perú, Ecuador y Colombia (PEC) con valores que oscilan entre 0,3 y 1, destacándose los mayores valores para R10 con tendencias significativas. En cuanto las tendencias negativas, se destaca un fuerte

núcleo sobre el departamento del Cauca con pendientes -3 de los índices R10 y R20, pero no son significantes. En general, el número de días secos CDD tiende a disminuir en Colombia con un fuerte núcleo en intercepción de las fronteras entre PEC con tendencias significativas y valores que oscilan entre -0,5 y -1,5. Por otro lado, los días húmedos CWD tiene tendencias positivas en el piedemonte llanero, el centro del departamento del Chocó y la frontera PEC. Tendencias negativas fueron encontradas para el sur la costa pacífica de Colombia, el extremo norte de Panamá y en Este del país. Estos resultados presentan similitudes con estudios realizados por el IDEAM (Benavides *et al.*, 2007). El índice SDII presenta tendencias positivas de manera generalizada con fuertes núcleos en sur del Pacífico colombiano, la región sur y noreste de Colombia y el norte de Ecuador; las tendencias no son significantes, a excepción del centro del departamento de Chocó, el este de Colombia y el norte de la Guajira.

En la Figura 5 se muestra la distribución espacial de los patrones de correlación entre R10, R20, CDD, CWD, SDII y RX5day, y los índices de teleconexión ALTRI, Biv ENSO, EOFAC, MEI y el NIÑO1, en JJA, para el período comprendido entre 1982-2015. Los resultados obtenidos muestran que los coeficientes de correlación entre

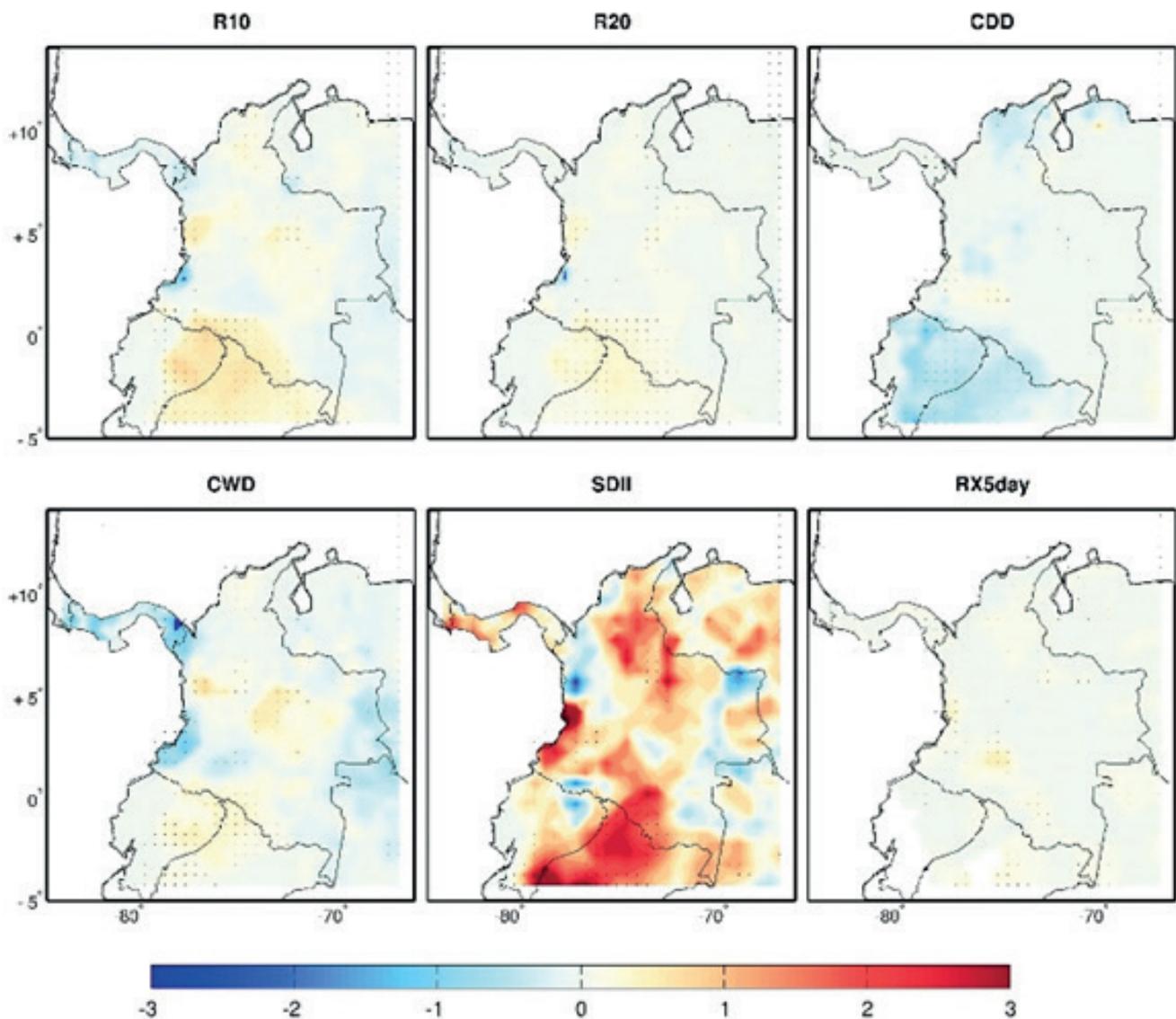


Figura 4. Distribución espacial de las tendencias de los índices extremos de precipitación R10, R20, CDD, CWD, SDII y RX5day para la estación JJA en el período 1982-2015; los puntos negros indican los lugares que presentan calores significantes, con un nivel de significancia de 5%.

R10, R20 y CWD y los índices de teleconexión (Biv ENSO, EOFAC, MEI y el NIÑO1), están dominados por una amplia banda de correlaciones negativas que oscilan entre $r=-0,35$ y $r=-0,85$, la cual cubre toda la franja limítrofe del suroeste de Colombia, extendiéndose además por las tres vertientes de la cordillera y las costa pacífica colombiana, hasta el extremo noroeste de Panamá y el Golfo de Maracaibo en Venezuela. En cambio, para el índice CDD este patrón de

comportamiento se invierte, principalmente respecto a Biv ENSO, EOFAC, MEI y el NIÑO1. Por otra parte, los coeficientes de correlación entre los índices RX5day y SDII, respecto a los índices de teleconexión Biv ENSO, EOFAC y MEI son en su gran mayoría negativos, con coeficientes entre $r=-0,4$ y $r=-0$, los cuales se sitúan sobre una gran franja de la cordillera Central y la costa pacífica de Colombia; en cambio en el extremo oeste, se aprecian algunos núcleos con

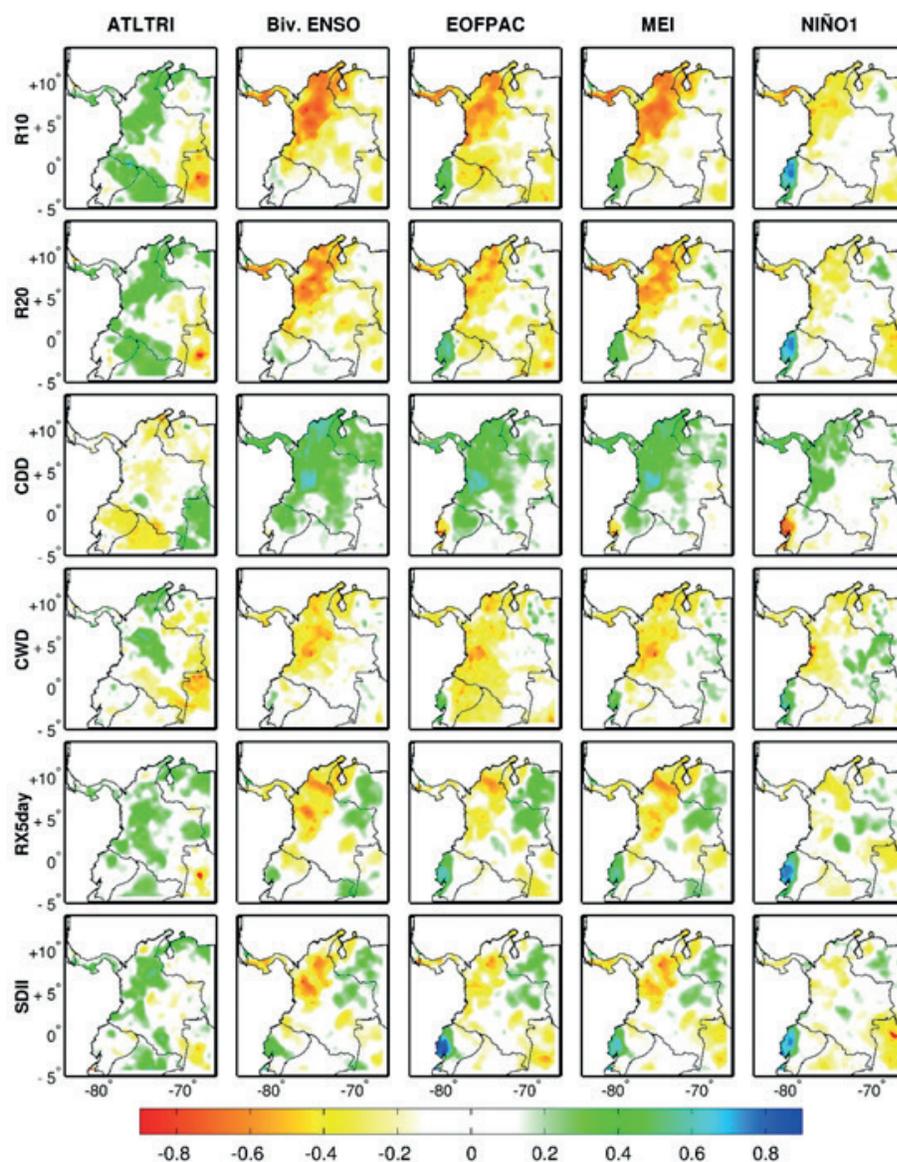


Figura 5. Muestra el mapa de coeficiente de correlaciones lineales entre los índices de teleconexión climático ATLTRI, Biv. ENSO, EOF PAC, MEI, y Niño1 (columnas) los índices extremos de precipitación R10, R20, CDD, CWD, RX5day y SDII (filas) de 1982-2015, para JJA en Colombia en el extremo noroeste de Suramérica.

coeficientes de correlación positiva bastante débiles (Figura 5). Finalmente, las correlaciones con el ATLTRI muestran correlaciones positivas pero débiles con los índices húmedos, aunque en algunos casos son significativas, igualmente se identifican regiones muy localizadas y dispersas sobre el área de estudio, con excepción del CDD.

La Figura 6 muestra el análisis temporal R10, R20, CDD, CWD, SCII y RX5day realizado

para los municipios Quibdó, Acandí, El Carmen del Atrato, Juradó, Litoral del San Juan y Sipí en el departamento del Chocó. En general, las tendencias observadas para la precipitación son estadísticamente significativas y exhiben tendencias decrecientes. El número de fuertes precipitaciones (R10 y R20) mostraron comportamientos temporales similares en los municipios de Quibdó, El Carmen del Atrato y Sipí, mientras que Juradó y Acandí, que tiene una tendencia

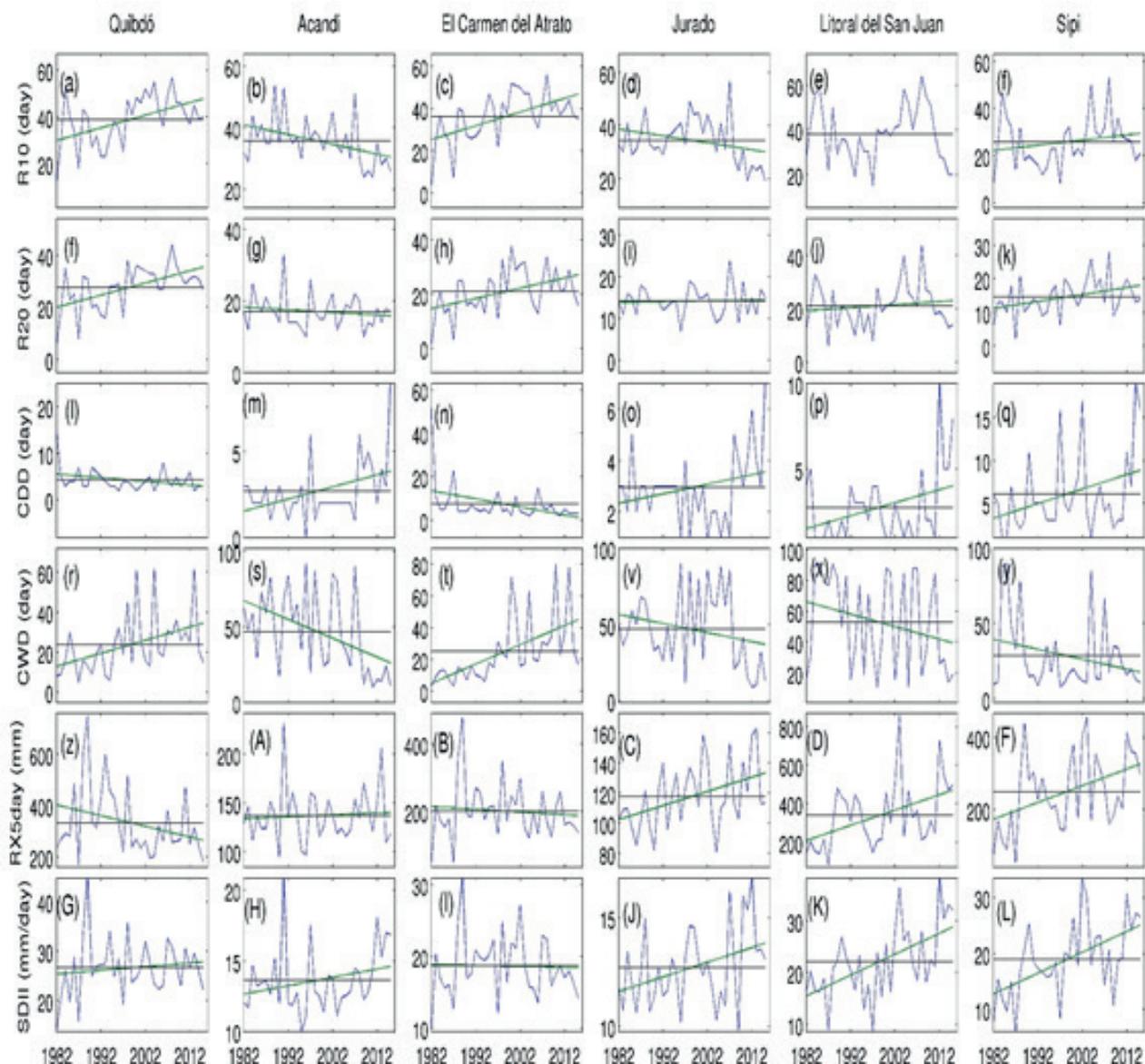


Figura 6. Distribución temporal (línea azul), tendencia (línea verde), y promedios (línea negra) de los índices extremos de precipitación R10, R20, CDD, CWD, RX5day y SDII (filas) y municipios en el departamento del Chocó como Quibdó, Acandí, El Carmen del Atrato, Juradó, Litoral del San Juan y Sipi (columnas), de 1982 a 2015 en la estación JJA.

negativa, se detectaron tendencias decrecientes significativas en R10.

En cuanto al número de días secos la Figura 6 muestra que el índice de precipitación extrema CDD exhibe tendencias crecientes en los municipios de Acandí, Juradó, Litoral del San Juan y Sipi, siendo la mayoría significativas ($p < 0,05$). De manera opuesta, los días húmedos consecutivos CWD muestran tendencias negativas en estos

municipios, con excepción de los municipios de Quibdó y El Carmen de Atrato que tienen una tendencia creciente en CWD y decreciente en CDD. El índice de precipitación máxima de 5 días (Rx5day, tiende a disminuir en municipios como Quibdó, Acandí y El Carmen del Atrato, además, en los municipios de Juradó, Litoral del San Juan y Sipi se muestra tendencias crecientes, lo cual podrá influir significativamente en la ocurrencia de eventos extremos en estas zonas. Por último,

el índice de intensidad de precipitación simple (SDII), muestra tendencias positivas de manera generalizada exceptuando el municipio de El Carmen del Atrato cuya línea de tendencia muestra una pendiente negativa no tan pronunciada.

Este análisis indica que, a escala regional, los cambios en los índices climáticos extremos se ven afectados por la variabilidad en los patrones de circulación atmosférica a gran escala, lo que evidencia la comprensión de la influencia de datos en cuadrícula para tener una mirada general del comportamiento de cambios y la variedad climática de una región.

Conclusiones

El objetivo principal de este estudio fue analizar los efectos de la precipitación extrema y su relación con el fenómeno índices de teleconexión en Colombia (caso de estudio departamento del Chocó), para la estación JJA.

Los resultados para los diferentes índices de precipitación R10, R20 y RX5day que están asociados con las tendencias de la temporada de lluvias, parecen indicar una tendencia a una reducción en la duración de la temporada de lluvias, en la zona andina, el sur occidente colombiano, específicamente sobre el Cauca, y en el extremo norte y sur de Colombia, mientras que las tendencias crecientes se situaron en la zona central y sur del departamento del Chocó, como la franja del piedemonte de la cordillera oriental y algunas zonas del suroccidente colombiano.

En promedio, para todos los índices de precipitación extrema, los coeficientes de correlaciones lineales entre los índices de teleconexión climático ATLTRI, Biv. ENSO, EOFAC, MEI y Niño1 y los índices extremos de precipitación R10, R20, CDD, CWD, RX5day y SDII, se encontró un aumento de los eventos extremos de sequía cuando se presenta el ENSO en el país y alto gra-

do de influencia del Atlántico con correlaciones positivas sobre los índices húmedos.

Se confirma la importancia de la reducción notable en el índice de precipitación anual total de días húmedos en la zona norte y costera del departamento del Chocó, con tendencia a un aumento de la sequía en los municipios de Acandí, Juradó, Litoral del San Juan y Sipí, y aumentos sustanciales en el centro del departamento; sin embargo, estos resultados no son estadísticamente significativos.

En conclusión, los resultados presentados en este estudio están de acuerdo con varios hallazgos de cambios en la precipitación por el IDEAM, pero algunos de esos hallazgos fueron apoyados principalmente por datos de una corta escala temporal y una escasa densidad de estaciones, mientras que el presente estudio se ha centrado en la precipitación diaria y extrema, sus tendencia y relación con los índices de teleconexión que han sido menos exploradas. Por lo tanto, el importante conjunto de datos de precipitación utilizado aquí, es decir, la densidad de las estaciones, la longitud de los registros y la calidad de los datos, y el rango de índices de precipitación examinados proporcionaron una contribución clave para caracterizar la estructura de la precipitación y los cambios en Colombia y algunos municipios del departamento del Chocó.

Se sugiere ampliar los análisis de los índices extremos a otros períodos del año, lo cual permita tener una idea global de los cambios en variabilidad del clima para Colombia y cómo estos se ven influidos por otros patrones de teleconexión.

Agradecimientos

Un reconocimiento especial y agradecimiento a la Universidad Tecnológica del Chocó (UTCH), su Vicerrectoría de Investigaciones, a la Facultad de Ingeniería, al Centro de Investigación en Ener-

gías Renovables y Climatología (CIERCLIMA), y también al Grupo de Investigación en Energías Renovables y Meteorología (GIERMET) por apoyar y financiar este trabajo.

Literatura citada

- Aguilar E, Peterson TC, Obando PR, Frutos R, Retana JA, Solera M, *et al.* 2005. Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961-2003. *J Geophys Res: Atmosp* 110: D23. Disponible en: <https://doi.org/10.1029/2005JD006119>
- Ahmadalipour A, Moradkhani H, Rana A. 2018. Accounting for downscaling and model uncertainty in fine-resolution seasonal climate projections over the Columbia River Basin. *Clim Dynam*. 50 (1-2): 717-33. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3639-4>
- Bartolomeu S, Carvalh MJ, Marta-Almeida M, Melo-Gonçalves P, Rocha A. 2016. Recent trends of extreme precipitation indices in the Iberian Peninsula using observations and WRF model results. *Phys Chem Earth, Parts A/B/C*. 94: 10-21. Disponible en: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pce.2016.06.005>
- Bashe MA, Stiller-Reeve MA, Saiful Islam AKM, Bremer S. 2018. Assessing climatic trends of extreme rainfall indices over northeast Bangladesh. *Theor Applied Climat*. 134 (1-2): 441-52. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2285-4>
- Benavides H, Moreno GH, Márquez RM. 2007. Análisis de índices de extremos climáticos para Colombia usando el RCLIMDEX. Disponible en: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/020661/NotaRclimdexfinal.pdf>
- Cardona-Guerrero F, Ávila-Díaz AJ, Carvajal-Escobar Y, Jiménez-Escobar H. 2014. Tendencias en las series de precipitación en dos cuencas torrenciales andinas del Valle del Cauca (Colombia). *TecnoLógicas* 17, (32) 85-95. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-77992014000100009
- Casanueva A, Rodríguez-Puebla C, Frías MD, González-Reviriego N. 2014. Variability of extreme precipitation over Europe and its relationships with teleconnection patterns. *Hydrol Earth Syst Sci*. 18: 709-25. Disponible en: <https://doi.org/10.5194/hess-18-709-2014>
- Collins M, Knutti R, Arblaster J, Dufresne J-L, Fichet T, *et al.* 2013. Long-term climate change: projections, commitments and irreversibility. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge and New York: Cambridge University. Disponible en: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter12_FINAL.pdf
- Córdoba-Machado S. 2015. *Predicción del clima de Colombia en escalas estacional e interanual*. Tesis de grado para optar al grado de Doctor en Física. Granada: Universidad de Granada. Disponible en: <https://hera.ugr.es/tesisugr/25601106.pdf>
- Córdoba-Machado S, Palomino-Lemus R, Gámiz-Fortis SR, Castro-Díez Y, Esteban-Parra MJ. 2016. Seasonal streamflow prediction in Colombia using atmospheric and oceanic patterns. *J Hydrol*. 538: 1-12. Disponible en: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.04.003>
- Cuartas DE, Caicedo DM, Ortega D, Cardona F, Carvajal Y, Méndez F. 2017. Tendencia espacial y temporal de eventos climáticos extremos en el Valle Geográfico del Río Cauca. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*. 20 (2): 267-78. Disponible en: <https://doi.org/10.31910/rudca.v20.n2.2017.386>
- Donat MG, Alexander LV, Yang H, Durre I, Vose R, Dunn RJH, Willett K, *et al.* 2013. Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: The HadEX2 dataset. *J Geop Res: Atmospheres*. 118 (5) 2098-118. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/jgrd.50150>
- Equipo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático (ETCCDI). 2009. *Climate Change Indices. ETCCID/CDR Climate Change Indices*. Disponible en: http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml
- Garreaud R, Aceituno P. 2007. *Atmospheric circulation and climatic variability*. In: Veblen TT, Young KR, Orme AR (Eds.). *The physical geography of South America*. Oxford: Oxford University Press. Disponible en: <https://global.oup.com/academic/product/the-physical-geography-of-south-america-9780195313413?cc=us&lang=en&#>
- Hansen J, Rodríguez E, Parodi J, González F, Marisa M. 2010. Proyecciones climáticas. En: *Física del caos en el predicción meteorológica*. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.31978/014-18-009-X.29>
- Herrera S, Gutiérrez JM, Ancell R, Pons MR, Frías MD, Fernández J. 2010). ¿Pueden los datos cuadrículados representar eventos extremos de precipitación? Reunión Internacional sobre climatología estadística. Disponible en: <https://www.meteo.unican.es/en/node/72883>
- Herrera S, Gutiérrez JM, Ancell R, Pons MR, Frías MD, Fernández J. 2012. Development and analysis of a 50-year high-resolution daily gridded precipitation dataset over Spain (Spain02). *Int J Climatol*. 32 (1): 74-85. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/joc.2256>
- IDEAM. 2007. *Análisis de índices de extremos climáticos para Colombia usando el RCLIMDEX*. Disponible en: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/020661/NotaRclimdexfinal.pdf>
- Kendall M. 1975. *Rank correlation methods*. 4th. London: Griffin.
- Laboratorio de Investigación de Sistemas Terrestres (ESRL) 2016). Series. Disponible en: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>
- Lader R, Wals J.E, Bhatt US, Bieniek PA. 2017. Projections of Twenty-First-Century Climate Extremes for Alaska via Dynamical Downscaling and Quantile Mapping. *J Applied Meteorol Climatol*. 56 (9): 2393-409. Disponible en: <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-16-0415.1>
- Liu S, Huang S, Huan Q, Xie Y, Leng G, Luan J, *et al.* 2017. Identification of the non-stationarity of extreme precipitation events and correlations with large-scale ocean-atmospheric circulation patterns: A case study in the Wei River Basin,

- China. *J Hydrol.* 548: 184-95. Disponible en: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.03.012>
- Long D, Scanlo BR, Fernando DN, Meng L, Quiring SM. 201. Are temperature and precipitation extremes increasing over the US high plains? *Earth Interact.* 16 (16): 1-20. Disponible en: <https://doi.org/10.1175/2012EI000454.1>
- Lovino MA, Müller OV, Berbery EH, Müller GV. 2018. How have daily climate extremes changed in the recent past over northeastern Argentina? *Global Planet Change.* 168: 78-97. Disponible en: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.06.008>
- Mei C, Liu J, Chen M-T, Wang H, Li M, Yu Y. 2018. Multi-decadal spatial and temporal changes of extreme precipitation patterns in northern China (Jing-Jin-Ji district, 1960-2013). *Quatern Int.* 476: 1-13. Disponible en: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.03.008>
- Mejía JF, Barco OJ, Correa PL. 2002. Influencia de fenómenos macroclimáticos sobre el ciclo anual de la hidrología colombiana: Cuantificación lineal, no lineal y percentiles probabilísticos. Recuperado de: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/018665/Lista%20Final/SalazarFernando3.doc>
- Muluneh A, Bewket W, Keesstra S, Stroosnijder L. 2017. Searching for evidence of changes in extreme rainfall indices in the Central Rift Valley of Ethiopia. *Theoret Appl Climatol.* 128 (3-4): 795-809. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1739-4>
- Pabón Caicedo JD. 2012. Cambio climático en Colombia: tendencias en la segunda mitad del siglo XX y escenarios posibles para el siglo XXI. *Rev Acad Colomb Cien Exactas, Físicas y Naturales.*, 36(139): Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-39082012000200010
- Pachaur RK, Meyer L, Brinkman S, Van Kesteren L, Leprince-Ringuet N, Van Boxmeer F. 2014. Cambio climático 2014. Informe de síntesis. En: *Informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Disponible en: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf
- Palomino-Lemus R, Córdoba-Machado S, Gámiz-Fortis SR, Castro-Díez Y, Esteban-Parra MJ. 2017. Climate change projections of boreal summer precipitation over tropical America by using statistical downscaling from CMIP5 models. *Environmental Research Letters* 12: 124011. Disponible en: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aa9bf7/pdf>
- Palomino-Lemus R. 2015. *Proyecciones de cambio climático para la precipitación en América tropical mediante técnicas de downscaling estadístico*. Granada: Universidad de Granada. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=56288>
- Panda DK, Panigrahi P, Mohanty S, Mohanty RK, Sethi RR. 2016. The 20th century transitions in basic and extreme monsoon rainfall indices in India: Comparison of the ETCCDI indices. *Atmosph Res.* 181: 220-35. Disponible en: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.07.002>
- Peterson TC, Hoerling MP, Stot PA, Herrin SC. 2013. Explaining extreme events of 2012 from a climate perspective. *Bull Am Meteorol Soc.* 94 (9): S1-S74. Disponible en: <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/BAMS-D-13-00085.1>
- Pinilla MC, Pinzón C. 2012. Caracterización de eventos extremos asociados a la precipitación usando RCLimindex, en la parte central del Departamento de Santander, Colombia. *Publicaciones de la Asociación Española de Climatología. Serie A; 8:* 593- 601. Disponible en: http://aeclim.org/wp-content/uploads/2016/02/0057_PU-SA-VIII-2012-MC_PINILLA.pdf
- Powell EJ, Keim BD. 2014. Trends in Daily Temperature and Precipitation Extremes for the Southeastern United States: 1948-2012. *J Climate.* 28 (4): 1592-612. Disponible en: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00410.1>
- Sánchez R, Enrique M, Clim C, Visi C, Desarrollo SC, Equipo C, et al. 2016. Climatología trimestral de Colombia. *Medio Ambiente* 1-4. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/nmo.12082> doi no corresponde. No está citada en el texto
- Santos M, Fragoso M, Santos JA. 2017. Regionalization and susceptibility assessment to daily precipitation extremes in mainland Portugal. *Applied Geograp.* 86: 128-38. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2017.06.020>
- Scian B, Pierini J. 2013. Variability and trends of extreme dry and wet seasonal precipitation in Argentina. A retrospective analysis. *Atmósfera.* 26 (1): 3-26. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0187-6236\(13\)71059-2](https://doi.org/10.1016/S0187-6236(13)71059-2)
- Sen PK. 1968. Estimates of the regression coefficient used on Kendall's Tau. *J Am Sta Assoc.* 63 (324): 1379-89. Disponible en: <https://doi.org/10.2307/2285891>
- Shi J, Cui L, Wen K, Tian Z, Wei P, Zhang B. 2018. Trends in the consecutive days of temperature and precipitation extremes in China during 1961-2015. *Environm Res.* 161: 381-91. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.11.037>
- Supari, Tangang F, Salimun E, Aldrian E, Sopaheluwakan A, Juneng L. (2018). ENSO modulation of seasonal rainfall and extremes in Indonesia. *Clim Dyn.* 51, (7-8) 2559-80. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00382-017-4028-8>
- Westra S, Alexander LV, Zwiers FW. 201. Global increasing trends in annual maximum daily precipitation. *J Clim.* 26 (11): 3904-18. Disponible en: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00502.1>
- Yang Y, Ga TY, Tan, X. 2019. Spatiotemporal changes in precipitation extremes over Canada and their teleconnections to large-scale climate patterns. *J Hydrometeorol.* Disponible en: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0004.1>
- Zhang X, Alexander L, Heger GC, Jones P, Tank AK, Peterson TC, Trewin B, Zwiers FW. 2011. Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *Wiley Interdiscipl Rev: Clim Change.* 2 (6): 851-70. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/wcc.147>
- Zhu J, Huang D-Q, Yan P-W, Huang Y, Kuang X-Y. 2017. Can reanalysis datasets describe the persistent temperature and precipitation extremes over China? *Theoret Applied Clim.* 130 (1-2): 655-71. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1912-9>
- Zittis G. 2018. Observed rainfall trends and precipitation uncertainty in the vicinity of the Mediterranean, Middle East and North Africa. *Theoret Applied Clim.* 134 (3-4): 1207-30.

Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2333-0>
Zolina O, Simmer C, Kapala A, Shabanov P, Becker P, Mächel
H, *et al.* 2014. Precipitation variability and extremes in

central Europe: New view from STAMMEX results. *Bull
Am Meteorol Soc.* 95 (7): 995-1002. Disponible en: [https://
doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00134.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00134.1)